

# Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/JP05/001429

International filing date: 01 February 2005 (01.02.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: JP  
Number: 2004-034174  
Filing date: 10 February 2004 (10.02.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 31 March 2005 (31.03.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland  
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

04. 2. 2005

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日            2 0 0 4 年   2 月 1 0 日  
Date of Application:

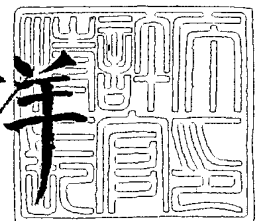
出 願 番 号            特 願 2 0 0 4 - 0 3 4 1 7 4  
Application Number:  
[ST. 10/C] :            [ J P 2 0 0 4 - 0 3 4 1 7 4 ]

出      願      人            財 団 法 人 理 工 学 振 興 会  
Applicant(s):

2 0 0 5 年   3 月 1 7 日

特 許 庁 長 官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

小 川 洋



【書類名】 特許願  
【整理番号】 03-266Z2  
【提出日】 平成16年 2月10日  
【あて先】 特許庁長官殿  
【国際特許分類】 G05D 19/00  
【発明者】  
    【住所又は居所】 神奈川県横浜市緑区長津田町 4 2 5 9 東京工業大学内  
    【氏名】 三宅 美博  
【特許出願人】  
    【識別番号】 899000013  
    【氏名又は名称】 財団法人理工学振興会  
【代理人】  
    【識別番号】 100097320  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 宮川 貞二  
    【電話番号】 03(3225)0681  
【選任した代理人】  
    【識別番号】 100100398  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 柴田 茂夫  
【選任した代理人】  
    【識別番号】 100096611  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 宮川 清  
【選任した代理人】  
    【識別番号】 100098040  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 松村 博之  
【選任した代理人】  
    【識別番号】 100097744  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 東野 博文  
【選任した代理人】  
    【識別番号】 100123892  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 内藤 忠雄  
【選任した代理人】  
    【識別番号】 100131820  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 金井 俊幸  
【手数料の表示】  
    【予納台帳番号】 047315  
    【納付金額】 21,000円  
【提出物件の目録】  
    【物件名】 特許請求の範囲 1  
    【物件名】 明細書 1  
    【物件名】 図面 1  
    【物件名】 要約書 1

**【書類名】 特許請求の範囲****【請求項 1】**

制御対象との非線形相互作用を介して前記制御対象と同調状態を形成する非線形システムからなる第 1 のモジュールと；

前記第 1 のモジュールが有する前記制御対象との同調に係わる関係量と目標とする関係量との差に基づいて、前記同調に係わる関係量を変化させるパラメータを調整するフィードバックシステムからなる第 2 のモジュールとを備え；

前記第 1 のモジュールの同調に係わる関係量を前記目標とする関係量に収束させることにより、前記制御対象を制御する；

非線形制御器。

**【請求項 2】**

前記第 1 のモジュールと前記制御対象とは異なる固有振動数で振動を行ない、前記非線形相互作用は引き込み現象を有する；

請求項 1 に記載の非線形制御器。

**【請求項 3】**

前記同調に係わる関係量が前記制御対象の振動と前記第 1 のモジュールの振動との位相差であり、前記パラメータが前記第 1 のモジュールの固有振動数である；

請求項 2 に記載の非線形制御器。

**【請求項 4】**

前記第 1 のモジュールと前記制御対象との同調状態はリズムの授受を介して形成される；

請求項 1 乃至請求項 3 のいずれか 1 項に記載の非線形制御器。

**【請求項 5】**

前記第 1 のモジュールと前記制御対象との同調状態は無線又はネットワークを用いて形成される；

請求項 1 乃至請求項 4 のいずれか 1 項に記載の非線形制御器。

**【請求項 6】**

制御対象との非線形相互作用を介して前記制御対象と同調状態を形成する工程と；

前記制御対象の動的振舞に関する状態変数を取得する工程と；

前記制御対象との同調に係わる関係量と目標とする関係量との差に基づいて、前記同調に係わる関係量を変化させるパラメータを調整する工程と；

前記調整されたパラメータを用いて、前記制御対象と新たな同調状態を形成する工程と；

を備える非線形的制御方法。

**【請求項 7】**

請求項 6 に記載の非線形的制御方法を制御器に実行させるための制御器読み取り可能なプログラム。

【書類名】明細書

【発明の名称】非線形制御器及び非線形的制御方法

【技術分野】

【0001】

本発明は、非線形制御器および非線形的制御方法に関する。詳しくは、制御器と制御対象とを明確に分離できない非線形システムについて、制御器と制御対象の同調に係る関係量を目標とする関係量へ収束させることを可能にする非線形制御器および非線形的制御方法に関する。

【背景技術】

【0002】

フィードバック制御は、制御器と制御対象からなるフィードバックループを構成することで、あらかじめ定められた目標状態に向かって制御対象の状態を安定に収束させる制御方法である。しかし、それは制御器側が制御対象側を一方的に制御し、目標状態に強制的に適応させるものであり、制御器と制御対象の動的振舞（ダイナミクス）を明確に分離できることが前提されている。そして、そのような前提条件が成立する場合においてのみ有効利用されてきた。

【0003】

しかし、近年の人工システムの巨大化および複雑化とともに、制御器と制御対象を必ずしも分離できない状況が多出しつつある。特に、人間をその一部分として含むシステムにおいてその傾向は顕著であり、制御器と制御対象のダイナミクスが相互干渉してしまう。そのような状況はシステムの非線形性と呼ばれ、線形近似を用いて両者を分離し、従来型のフィードバック制御に還元する方法がこれまで用いられてきた。しかし、このような前提が成立しない非線形システムの場合においても、また、線形近似が本質的に不可能と考えられるような非線形性が非常に強いシステムに対しても、それを無理に線形近似してフィードバック制御を適用することが多くなされてきた。

【0004】

このような背景の中で非線形システムを無理に線形化するのではなく、その非線形性を積極的に利用するシステムの提案もなされている。非線形システムにおいては制御器と制御対象のダイナミクスが相互干渉し、状態が時間と共に振動的に変動する非線形振動（例えばリミットサイクルなど）やその相互作用を介する引き込み現象が広く観察されている。そのような非線形振動やそれらの間での非線形相互作用を利用しようとする試みである。例えば、2足歩行ロボットの歩行運動の制御に非線形性を利用し、その歩行運動を安定化させた例（非特許文献1参照）や、このような非線形性を人間のコミュニケーション支援に応用した例（特許文献1参照）などが報告されている。このような非線形振動やその相互作用を介する同調現象（引き込み現象と呼ばれる）を活用するシステムにおいては、環境変動に対する歩行運動の大域的な安定性の向上や人間のコミュニケーションにおける臨場感の改善等の有効性が報告されている。これらは無理に線形近似しフィードバック制御を適用するという問題点を回避した効果である。

【0005】

【特許文献1】特開2000-349920号公報（段落0004、0018～0025、図1～図6等）

【非特許文献1】「生命システムのデザイン原理をさぐる」、多賀巖太郎著、サイエンス社発行、「数理科学」、第394巻、5～13頁、1996年

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

上記のような非線形振動のダイナミクスはシステムの安定性や自律性という有用性も生むが、それと同時に制御困難性という問題をあわせ持つ。しかも、このような非線形システムにおいては相変わらず制御器と制御対象のダイナミクスを分離できないので、目標状態へ収束させる制御方法が明らかではなく、試行錯誤的にシステムの調整を進めなければ

システムを使いこなせないという問題が残されていた。

【0007】

本発明は、このような課題に鑑みてなされたものであり、制御器と制御対象を明確に分離できない非線形システムの場合においても、制御器と制御対象の関係を目標とする関係へ収束させることを可能にする新しい制御器および制御方法を提案することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明は、非線形性を積極的に利用することで非線形システムに固有の動的振舞（ダイナミクス）を活用し、それにフィードバック制御手法を統合し、制御可能なシステムとして再構成するものである。これによって制御器と制御対象を明確に分離できない非線形システムの場合においても、制御器と制御対象の関係を目標とする関係へ収束させることを可能にする新しい制御方法が実現される。かかる制御方法を「関係的システム制御方法」ということとする。

【0009】

請求項1に記載の非線形制御器1は、例えば図1に示すように、制御対象2との非線形相互作用を介して制御対象2と同調状態を形成する非線形システム（NLS）からなる第1のモジュール3と、第1のモジュール3が有する制御対象2との同調に係わる関係量5と目標とする関係量との差に基づいて、同調に係わる関係量5を変化させるパラメータを調整するフィードバックシステム（FBS）からなる第2のモジュール4とを備え、第1のモジュール3の同調に係わる関係量5を目標とする関係量に収束させることにより、制御対象2を制御する。

【0010】

このように構成すると、非線形振動における相互作用を介して、従来困難とされた非線形システムの制御についても関係量を目的値に収束させる制御を可能とする。

【0011】

制御器1は第1のモジュール3と第2のモジュール4から構成される。第1のモジュール3は非線形システム（NLS）であり、具体的には非線形振動系として構成され、同じく非線形振動系としての性質を有する制御対象2との間で、相互作用における引き込み現象を介して同調状態を成立させる。第2のモジュール4はフィードバックシステム（FBS）であり、第1のモジュール3と制御対象2間に生成される同調状態において、同調に係わる関係量5を計測し、それを目標とする関係量と比較することによって適切なフィードバック制御量を計算し、同調に係わる関係量5を変化させる第1モジュール3のパラメータを調整する。これによって、制御器1と制御対象2の同調に係わる関係量5を目標とする関係量に収束させる。

【0012】

このように、非線形システムとしての特性とフィードバック制御の特性を統合することで、制御器1と制御対象2の動的振舞を明確に分離できない場合においても同調に係わる関係量5を目標とする関係量へ収束させられる「関係的システム制御方法」を提供するものである。なお、同調状態とは異なる振動数の非線形振動が自発的に同一の振動数かつ一定の位相関係で振動する状態をいうが、ここでは、非線形振動から近づいていくので、同一の振動数かつ一定の位相関係に近い状態、例えば平均的に同一の振動数かつ平均的に一定の位相関係の状態を含むものとする。

【0013】

また、請求項2に記載の発明は、請求項1に記載の非線形制御器1において、第1のモジュール3と制御対象2とは異なる固有振動数で振動を行ない、非線形相互作用は引き込み現象を有する。このように構成すると、その相互作用における引き込み現象を生じさせることにより、非線形システムの制御を行なうことができる。

【0014】

ここにおいて、引き込み現象とは、異なる非線形振動の間でダイナミクスが相互適応す

る過程であり、異なる振動数の非線形振動が相互作用を介して自発的に同調状態に至る現象をいう。引き込み現象については、例えば、「会話による意思疎通は、単に音声だけでなく、頭の傾き動作、口の開閉動作、又は身体の身振り動作等、各種挙動を互いに認識しながら会話のリズムを共有し、互いが相手を自分の話の中へと引き込む（これを身体的引き込み現象又は単に引き込み現象と呼ぶ）ことにより、より円滑又は親密になる。」と説明されている。（特許文献1参照）

#### 【0015】

また、請求項3に記載の発明は、請求項2に記載の非線形制御器1において、同調に係わる関係量5が制御対象2の振動と第1のモジュール3の振動との位相差 $\Delta\phi$ であり、パラメータが第1のモジュール3の固有振動数 $\omega_1$ である。このように構成すると、同調関係を積極的に利用して制御器1と異なる固有振動数 $\omega_2$ を有する制御対象2の制御を行なうことができる。

#### 【0016】

また、請求項4に記載の発明は、請求項1乃至請求項3のいずれか1項に記載の非線形制御器1において、第1のモジュール3と制御対象2との同調状態はリズムの授受を介して形成される。このように構成すると、制御器1と制御対象2間でセンサやリズム音出力を介して状態変数の授受ができ、例えばペースメーカのような小型、軽量の機器で制御器を製作でき、さらに、リズムの授受を用いて広範な応用が可能になる。

#### 【0017】

また、請求項5に記載の発明は、請求項1乃至請求項4のいずれか1項に記載の非線形制御器1において、第1のモジュール3と制御対象との同調状態は無線又はネットワークを用いて形成される。このように構成すると、無線又はネットワークを用いて遠隔操作による同調状態を実現でき、種々のデータを利用したり、遠隔地間での多彩な活用が可能になる。

#### 【0018】

また、請求項6に記載の非線形的制御方法は、例えば、図4および図6に示すように、制御対象2との非線形相互作用を介して制御対象2と同調状態を形成する工程と、制御対象2の動的振舞に関する状態変数を取得する工程（ステップS301）と、制御対象2との同調に係わる関係量5と目標とする関係量との差に基づいて、同調に係わる関係量5を変化させるパラメータを調整する工程（ステップS403～S406）と、調整されたパラメータを用いて、制御対象2と新たな同調状態を形成する工程（ステップS303～S306）とを備える。

#### 【0019】

このように構成すると、非線形振動における相互作用を介して、従来困難とされた非線形システムの制御についても関係量を目的値に収束させる制御を可能とする。

#### 【0020】

請求項7に記載の発明は、請求項6に記載の非線形的制御方法を制御器1に実行させるための制御器読み取り可能なプログラムである。

#### 【発明の効果】

#### 【0021】

本発明によれば、制御器と制御対象を明確に分離できない非線形システムの場合においても、制御器と制御対象の関係を目標とする関係へ収束させることができる。これによって、非線形システムを無理に線形化してフィードバック制御せずに、非線形性を積極的に活用することで、非線形システムの制御が可能になり、また、広範な非線形システムの制御への応用が可能になる。

#### 【発明を実施するための最良の形態】

#### 【0022】

以下、図面を参照して、本発明を実施の形態について説明する。

#### 【0023】

図1に、本発明の実施の形態による非線形制御システムの構成例を模式的に示す。制御

器 1 と制御対象 2 から構成される非線形システム 100 において、制御器 1 は第 1 のモジュール 3 および第 2 のモジュール 4 から構成される。第 1 のモジュール 3 は非線形システムモジュール（以下 NLS モジュールと略する）であり、第 2 のモジュール 4 はフィードバックシステムモジュール（以下 FBS モジュールと略する）である。

#### 【0024】

制御器 1 を、非線形システムとしての第 1 のモジュール 3 とフィードバックシステムとしての第 2 のモジュール 4 という 2 つのモジュールから構成し、制御対象 2 と非線形相互作用を介して同調状態を形成する第 1 のモジュール 3 に対して、第 2 のモジュール 3 から制御対象 2 との同調に係わる関係量 5 を目標とする関係量に収束させるようにフィードバックすることにより、制御対象 2 を制御する。すなわち、「関係的システム制御方法」を、非線形システムの制御方法として応用するものである。

#### 【0025】

非線形システム 100 は制御器 1 と制御対象 2 から構成される。非線形性とは、制御器 1 と制御対象 2 の動的振舞（ダイナミクス）が分離できないことを意味している。従来のフィードバック制御は線形システムにその適用領域が限定されており、このことは制御器 1 と制御対象 2 のダイナミクスを分離できることに対応する。分離できるからこそ制御器 1 が制御対象 2 を制御することが可能になるのである。非線形システムの場合は両者のダイナミクスが分離できないから、制御することは制御されることになってしまい、いわゆるフィードバック制御は成立しない。

#### 【0026】

非線形システムは、そのような意味で制御が困難なシステムである。しかし、非線形振動とその引き込み現象によって生じる同調関係に注目すれば制御が部分的に可能になる。本実施の形態においては、制御器 1 および制御対象 2 は非線形振動のダイナミクスを有するものとし、相互作用を介して引き込み現象を生じ同調するものとする。この引き込みは、非線形振動の相互作用に特徴的な同調現象であり、異なる振動数の非線形振動の間でダイナミクスが相互適応する過程で、自発的に同一の振動数かつ一定の位相関係で同調振動に至るのである。ここでは、非線形振動から同調状態に近づいていくので、同調状態には、同一の振動数かつ一定の位相関係に近い状態、例えば平均的に同一の振動数かつ平均的に一定の位相関係の状態を含むものとする。

#### 【0027】

制御器 1 は第 1 のモジュール 3 と第 2 のモジュール 4 から構成される。第 1 のモジュール 3 は非線形システムであり、具体的には非線形振動系として構成され、同じく非線形振動系としての性質を有する制御対象 2 との間で、相互作用における引き込み現象を介して同調状態を成立させる。第 2 のモジュール 4 はフィードバックシステムであり、第 1 のモジュール 3 と制御対象 2 間に生成される同調状態において、第 1 のモジュール 3 と制御対象 2 の同調に係わる関係量 5 を計測し、それを目標とする関係量と比較することによって適切なフィードバック制御量を計算し、同調に係わる関係量 5 を変化させる第 1 のモジュール 3 のパラメータを調整することにより、第 1 のモジュール 3 にフィードバックをかける。これによって、目標とする関係量を制御器 1 と制御対象 2 の同調関係において成立させる。

#### 【0028】

このように、本実施の形態によれば、非線形システムとしての特性とフィードバック制御の特性を統合することで、制御器と制御対象のダイナミクスを明確に分離できない場合においても、それらの関係量を目標とする関係量へ収束させられる「関係的システム制御方法」を提供できる。

#### 【0029】

図 2 に非線形振動の相互作用系の構成例を模式的に示す。ここで、本実施の形態において基盤となる引き込み現象について説明を補足する。一方の部分系 6 が制御器 1 に対応し、他方の部分系 7 が制御対象 2 に対応する。それぞれの部分系 6、7 は非線形振動のダイナミクスを有するものとし、それぞれの部分系 6、7 の振動数を、振動数  $\omega_1$ 、振動数  $\omega$



2とし、さらに両振動子の同調に係わる関係量5を、位相に注目して、位相差 $\Delta\phi$ で表現すれば、2つの部分系6、7の相互作用が対称とみなせる場合には、相互作用を介して同調した引き込み状態における位相差 $\Delta\phi$ は以下になる。

#### 【0030】

定性的に説明すれば、次の3つの場合に分類できる。第1のケースは $\omega_1 > \omega_2$ のときであり、そのときには $\Delta\phi > 0$ 、つまり、部分系6の方が部分系7よりも引き込み状態において位相進みとなる。部分系6の方が部分系7よりもタイミングが進んでいるのである。

第2のケースは $\omega_1 < \omega_2$ のときであり、そのときには $\Delta\phi < 0$ 、つまり、部分系7の方が部分系6よりも位相進みとなる。第3のケースは $\omega_1 = \omega_2$ であり、そのときには $\Delta\phi = 0$ 、つまり、部分系1と部分系2が同一位相となる。したがって部分系の振動数 $\omega$ を調整することで、部分系間の位相差 $\Delta\phi$ という関係量を変化させることが可能になる。

#### 【0031】

上記のような非線形システム、特に非線形振動の引き込み現象の特徴を念頭において、図1を参照して、制御器1の構成を再確認する。制御器1はNLSモジュール3とFBSモジュール4から構成される。NLSモジュール3は、制御対象2との間で非線形システムを構成し、制御対象2と相互作用する部分であり、引き込み現象を生成させることができる。一方、FBSモジュール4は、そのような非線形相互作用を介して生成される関係量5( $\Delta\phi$ )と目標とする関係量との差に基づいて、NLSモジュール3をフィードバック制御する部分であり、関係量5を目標値に収束させることにより、制御対象2を制御する。

#### 【0032】

図3に、NLSモジュール3の構成例を模式図で示す。NLSモジュール3は、基本的に非線形振動としてのダイナミクスを生じるシステムとして構成される。信号入力部31、演算部32、信号出力部33を有する。信号入力部31は、制御対象2に係わる外部状態変数がNLSモジュール3に入力される部位であり、例えば、センサなどで制御対象2から検出される振動の動作リズムなどが入力される。NLSモジュール3は非線形振動としての内部状態変数を有し、入力された外部状態変数を有する制御対象2との間で相互作用する。演算部32は、非線形振動としての内部状態変数を時間的変動させる部位である。例えばNLSモジュール3の振動の位相と目標とすべき位相との差を計算し、目標に近づけるための新たな振動(位相の変化を含む)を生成して内部状態変数を変更する。信号出力部33は、この演算部32において決定された内部状態変数を制御対象2に出力する。例えば新たに生成した振動をリズム音として制御対象2に伝達する。

#### 【0033】

例えば、制御対象2およびNLSモジュール3のダイナミクスがそれぞれ非線形振動として近似できる場合であれば、制御対象2側の状態変数を位相 $\phi_2$ 、固有振動数を $\omega_2$ とおき、NLSモジュール3側の状態変数を位相 $\phi_1$ 、固有振動数 $\omega_1$ とおけば、両者の相互作用は結合強度を $k_1$ ( $\geq 0$ )、 $k_2$ ( $\geq 0$ )として、以下のように記述される。

$$\frac{d\phi_1}{dt} = \omega_1 + k_1 \cdot \sin(\phi_2 - \phi_1) \quad (\text{式1})$$

$$\frac{d\phi_2}{dt} = \omega_2 + k_2 \cdot \sin(\phi_1 - \phi_2) \quad (\text{式2})$$

このとき(式1)がNLSモジュール3に対応し、(式2)が制御対象2に対応する。なお、ここでは位相 $\phi$ を用いて最も簡単な記述を行なったが、さらに拡張された多自由度の非線形振動としての記述も当然可能である。

#### 【0034】

図4にNLSモジュール3の処理のアルゴリズムをフローチャートとして示す。このアルゴリズムをまとめると次のようである。

1) 制御対象2の動的振舞(ダイナミクス)に関する状態変数が入力される(ステップS301)。

- 2) 入力された状態変数から位相に関する状態変数に変換する (ステップ S 3 0 2)。
- 3) 制御対象 2 の位相と N L S モジュール 3 内部の位相との関係量 (例えば差) を計算する (ステップ S 3 0 3)。
- 4) 関係量に基づいて N L S モジュール 3 内部の位相の時間的変化量を計算する (ステップ S 3 0 4)。
- 5) N L S モジュール 3 内部の新しい位相を定める (ステップ S 3 0 5)。
- 6) この位相が制御対象 2 側の状態変数に変換され出力される (ステップ S 3 0 6)。
- 7) 上記の 1) ~ 6) を常時繰り返す。

#### 【0035】

図 5 に、F B S モジュール 4 の構成例を模式図で示す。F B S モジュール 4 は、基本的にフィードバック制御を実現するシステムとして構成される。信号入力部 4 1、演算部 4 2、信号出力部 4 3 を有する。信号入力部 4 1 は、制御対象 2 と N L S モジュール 3 の非線形相互作用を介して生成される関係量 5 が F B S モジュール 4 に入力される部位であり、例えば N L S モジュール 3 の演算部 3 2 で算出された関係量が入力される。演算部 4 2 は、目標とする関係量と入力された関係量の関係から、フィードバック制御信号 F B (具体的には制御量) を算出する部位である。信号出力部 4 3 は、この演算部 4 2 において決定された制御信号 F B を N L S モジュール 3 に出力し、N L S モジュール 3 の関係量 5 を変更させるパラメータを調整する。

#### 【0036】

例えば、制御対象 2 および N L S モジュール 3 のダイナミクスが非線形振動として近似できる場合であれば、上記の式 1 および式 2 として記述できるので、F B S モジュール 4 に入力される関係量は、

$$\Delta \phi = \phi 1 - \phi 2 \quad (\text{式 } 3)$$

で記述される。ここで目標とする関係量を  $\Delta \phi 0$  とおけば、つまり、目標とする制御対象 2 と N L S モジュール 3 の位相差に係る関係量を  $\Delta \phi 0$  と定めれば、フィードバック制御信号 F B は、係数を  $k 3 (> 0)$  として、

$$F B = k 3 \cdot (\Delta \phi - \Delta \phi 0) \quad (\text{式 } 4)$$

と定められるので、(式 4) に基づいて N L S モジュール 3 を制御すればよい。一例として、N L S モジュール 3 の固有振動数  $\omega 1$  をパラメータとして増減させることが有効である。

$$d \omega 1 / d t = -F B = -k 3 \cdot (\Delta \phi - \Delta \phi 0) \quad (\text{式 } 5)$$

(式 5) のように調整することで、目標とする関係量を制御対象 2 および N L S モジュール 3 の間に実現できる。なお、ここでは最も簡単なフィードバック機構を記述したが、さらに拡張されたフィードバック制御手法を適用することも当然可能である。

#### 【0037】

図 6 に F B S モジュール 4 の処理のアルゴリズムをフローチャートとして示す。このアルゴリズムをまとめると次のようである。

- 1) 制御対象 2 と N L S モジュール 3 の関係量が入力される (ステップ S 4 0 1)。
- 2) 入力された関係量から位相差に関する関係量に変換する (ステップ S 4 0 2)。
- 3) 変換された関係量と目標とする関係量の差を計算する (ステップ S 4 0 3)。
- 4) 関係量の差に基づいてフィードバック制御信号 F B (具体的には制御量) を算出する (ステップ S 4 0 4)。
- 5) 算出されたフィードバック制御信号 F B を N L S モジュール 3 のパラメータ (例えば固有振動数) の修正量に変換する (ステップ S 4 0 5)。

6) 変換されたパラメータに対する修正量を用いて、NLS モジュール 3 のパラメータを調整する (ステップ S406)。

7) 上記の 1) ~ 6) を常時繰り返す。

#### 【0038】

以上のことから、本発明の実施の形態によれば、制御器 1 と制御対象 2 の非線形性によって相互干渉が生じフィードバック制御が適用できない場合においても、非線形システムを構成する NLS モジュール 3 と、そこに生成する関係量を制御する FBS モジュール 4 とにより、制御器 1 と制御対象 2 の関係を目標とする関係へ収束させる関係的システム制御方法を採用することで、制御器 1 と制御対象 2 の関係量に関する制御が可能になる。

#### 【実施例 1】

#### 【0039】

つぎに、本発明にかかる第 1 の実施例として、機械—人間系におけるバイオフィードバックの例について具体的に説明する。

#### 【0040】

この領域では、機械側を制御器、人間側を制御対象として、例えば、人間の身体運動やコミュニケーションの中の様々な状態を目標とする状態に制御することが目指されてきた。しかし、人間の身体運動やコミュニケーションの中には非線形性、特に非線形振動を伴うものが多い。例えば、身体運動であれば歩行リズムや走行リズム、さらに、ダンスや体操などが、コミュニケーションであれば対話における間や頷きが、その他、人間が共同で行なう音楽アンサンブルなどが非線形振動として挙げられる。これらの身体運動やコミュニケーションにおいては、その強い非線形性によって従来型のバイオフィードバックを構成することが出来ないのである。

#### 【0041】

しかし、人間のもつこのような非線形ダイナミクスを無視して線形近似することでフィードバック制御を人間側に無理に適用する制御法が行なわれてきた。そのようなシステムは人間にとって不自然なダイナミクスを要求するだけでなく、身体運動やコミュニケーションの支援という観点からすれば有害でさえある。むしろ、人間の持つ非線形性を積極的に利用する制御方法の方が、人間にとってはるかに使いやすいシステムになることが容易に予想される。

#### 【0042】

図 7 に、本実施例における機械—人間系制御システム 200 の構成例の模式図を示す。これは、人間と一緒に歩調を合わせて歩く歩行機械 (例えば歩行ロボットなど) により、人間の歩行運動を制御する例である。歩行機械は人間の歩行リズムとタイミングを合わせて同調歩行する。図 7 において、11 は制御器側に対応する歩行機械で、NLS モジュール 13 と FBS モジュール 14 により構成され、12 は制御対象側に対応する人間の歩行運動である。さらに、人間側から出力される信号を機械側へ入力する信号入力機構 15 と機械側から出力される信号を人間側へ入力する信号出力機構 16 が歩行機械 11 と歩行運動 12 間の交信を行なう。なお、信号入力部 31 (図 3 参照) は信号入力機構 15 の一部を構成し、信号出力部 33 (図 3 参照) は信号出力機構 16 の一部を構成する。

#### 【0043】

歩行運動は一種の非線形振動と見なせるので、その脚運動のダイナミクスを位相 (時間の関数である) と固有振動数で記述できる。しかも、人間側と機械側の相互作用には、脚運動に伴うリズム信号の交換を介する相互作用等が成立し得る。その場合には、人間側の歩行リズムと機械側の歩行リズムとが相互作用し、引き込み同調を生成させる非線形振動系を構成することができ、しかも両者の位相関係を制御することが可能である。

#### 【0044】

人間の歩行運動 12 側から歩行機械 11 側への信号入力機構 15 として、例えば、人間側の脚運動の検出センサとして、靴底に圧力センサを装着して圧力変化により脚接地タイミングを抽出したり、足首に加速度センサを装着して加速度変化により脚接地タイミングを取り出し、歩行機械 11 側へ送信する構成や、歩行機械 11 側から人間の歩行運動 12

側への信号出力機構 16 として、例えば、人間側にリズム音を伝えるイヤホンなどを装着させ歩行機械 11 の脚接地タイミングを人間側に送出する構成がある。

#### 【0045】

ここで、図 3 と図 7 を参照する。まず、制御器側に対応する歩行機械 11 の NLS モジュール 13 における信号入力部 31 には、制御対象側である人間の歩行運動 12 における脚接地（動的振舞）のタイミングに関する状態変数（圧力センサの圧力変化や加速度センサの加速度変化など）が入力される（ステップ S301）。これに基づいて人間側の位相（歩行リズムの位相）が計算され（ステップ S302）、演算部 32 において NLS モジュール 13 内部の位相（歩行機械 11 の歩行リズムの位相）との位相差が例えば（式 3）により計算される（ステップ S303）。さらに、（式 1）によって、NLS モジュール 13 内部の位相の相互作用に起因する時間的変化量が計算され（ステップ S304）、それに基づいて新しい位相が定められる（ステップ S305）。そして例えば、歩行機械 11 側の脚接地に対応する位相が新しい位相にマッチングすると、信号出力部 33 から歩行機械 11 の脚接地タイミングに関する状態変数（リズム音など）が発生し人間側に伝えられる（ステップ S306）。

#### 【0046】

次に、図 5 と図 7 を参照する。制御器側に対応する歩行機械 11 の FBS モジュール 14 における信号入力部 41 には、制御対象側である人間の歩行運動 12 における脚接地（動的振舞）のタイミングに関する状態変数（圧力センサの圧力変化や加速度センサの加速度変化など）が入力される（ステップ S401）。これに基づいて人間側の位相（歩行リズムの位相）が計算され、演算部 42 において NLS モジュール 13 内部の位相との関係量としての位相差が例えば（式 3）により計算される（ステップ S402）。ここまでは NLS モジュール 13 での処理フローと同じであり（NLS モジュール 13 内部の位相の入力が加わるが）、これらの処理プロセスは両モジュール間で共有されてもよい。さらに FBS モジュール 14 では、測定された位相差（関係量）と目標とする位相差（目標とする関係量）との差が計算され（ステップ S403）、例えば（式 4）によりフィードバック制御信号 FB が計算され（ステップ S404）、これに基づいて NLS モジュール 13 のダイナミクスを規定する例えば（式 1）の固有振動数  $\omega_1$ （パラメータ）の修正量が例えば（式 5）に基づいて計算される（ステップ S405）。この修正量が例えば信号出力部 43 を介して NLS モジュール 13 に対して伝えられ、パラメータが調整される（ステップ S406）。

#### 【0047】

このような「関係的システム制御方法」を用いる制御方法には主として 3 つの効果が期待される。第 1 は、人間にとって使いやすい機械－人間系が構成できるという改善点である。人間の身体運動やコミュニケーションに係わる多くのダイナミクスが非線形であることから、それを無理に線形近似したフィードバックシステムとして構成することは、人間側からすれば非常に使いにくいシステムということになる。これは操作性だけでなく心理的な側面にも負の影響を及ぼす。しかし本実施例によれば、人間の自然な動作やコミュニケーションを機械－人間系に再構成できるようになる。なお、歩行機械側はハードウェアとして構成された機械システムである必要は必ずしもなく、離れて設置した又は人間に装着したコンピュータ内に非線形的制御方法のソフトウェアを組み込み、人間に装着した可搬型のペースメーカーと無線又は有線のインタフェースを介してコンピュータから制御するように構成しても良い。

#### 【0048】

第 2 の効果は、非線形ダイナミクスのもつ動的安定性に基づく人間の歩行運動の安定化の効果である。非線形振動の引き込み現象として生成される同調状態は外乱に対して安定性を獲得することが知られているが、それを人間の歩行リズムと歩行機械の歩行リズムの間でのグローバルな安定化のために応用できる。これは転倒防止など歩行介助機能としての活用が想定できる。第 3 の効果は、フィードバックシステムによる人間の歩行運動の矯正効果である。上記の引き込み状態における関係量（位相差など）は制御可能であるが、

これによって機械側の歩行リズムと人間側の歩行リズムの間で一定のズレを生成することができる。このようにタイミングのズレを意図的に人間側に入力することで歩行運動を促進したり抑制したりできるので、これを用いて歩行リハビリテーションなどにおける矯正効果を生じさせることも可能である。

#### 【0049】

これと類似の方法を用いれば他の機械－人間系の制御についても適用が可能である。歩行に限らずランニングにもほぼ同様のシステムが適用できるが、その場合には上記の実施例に加えてトレーニング効果や健康維持効果も含まれる。ダンスや体を動かすゲームのように音楽を用いるトレーニングの場合にも、楽譜の演奏位置を指定する位相とそのテンポとしての固有振動数を定義すれば本手法を適用することが可能である。これはダンスだけに限らず、音楽に合わせて歩いたりランニングしたりする場合にも適用できる。さらに、人間と機械の音楽アンサンブルやカラオケ（人間のテンポに同調する）にも適用可能であり、その場合であれば演奏のハーモニーや即興性などの心理的な効果も含まれるであろう。対話の場合においても、発話とポーズのリズムに注目して位相と固有振動数を定義できれば、間の合う音声インタフェース（音声合成を用いたロボットなど）などへの応用が可能である。

#### 【0050】

また、類似の方法を機械－動物系の制御についても適用が可能である。牛や羊の群を牧草地や厩舎に導くために、リズム音に合わせて歩行するように訓練されたリーダー格の牛や羊（複数でも良い）に運動リズムを検出するセンサと、リズム音を出力するスピーカなどを有するペースメーカーを装着し、牛や羊の動作リズムに合わせながら、リズム音で誘導するペースメーカーは非線形制御器といえる。リズム音の位相差を関係量として、固有振動数の修正量を用いることによって、リーダーの動きを通して群を動かすことができる。

#### 【0051】

また、制御器1と制御対象2との同調状態を無線又はネットワークを用いて形成すると、遠隔操作により、人間、動物、機械などの非線形制御が可能になる。さらに、種々のデータを利用したり、遠隔地間での多彩な活用が可能になる。

#### 【0052】

以上のことから、本実施例によれば、非線形システムの特性を活かし、しかも、それをフィードバック制御できるようにしたことで、これまでのバイオフィードバックで扱うことができなかった様々な機械－人間系の相互作用の制御を実現できる。

#### 【実施例2】

##### 【0053】

つぎに、本発明にかかる第2の実施例として、機械－機械系における協調制御の例について具体的に説明する。

##### 【0054】

この領域では、従来からフィードバック制御が主流であり、一方の機械側を制御器（マスター）、他方の機械側を制御対象（スレーブ）とすることで、制御器側が制御対象の状態を目標とする状態に制御することが実現されてきた。これは計算機ネットワークにおいても同様であり、サーバ計算機（制御器）とクライアント計算機（制御対象）により構成されていた。しかし、群ロボットにおける協調作業や計算機ネットワーク上での相互作用には非線形性を伴うものが多い。そこで、これらの非線形性に起因するダイナミクスを活用すれば、従来は制御が困難であったロボット間やエージェント（ソフトウェアモジュール）間でのタイミング制御が可能になる。

##### 【0055】

図7を、本実施例における機械－機械系の制御例にも類推適用できる。すなわち、第1の実施例における制御対象側に対応する人間の歩行運動12を制御対象側に対応する歩行機械（符号12をそのまま用いることとする）に置換すれば良い。これは、一方の歩行機械（歩行ロボットなど）11が他方の歩行機械（歩行ロボットなど）の歩行運動を制御す

る例である。一方の歩行機械は他方の歩行機械の歩行リズムとタイミングを合わせて同調歩行する。

#### 【0056】

ここで、図3と図7を参照する。まず、制御器側に対応する歩行機械11のNLSモジュール13における信号入力部31には、制御対象側である歩行機械12における脚接地（動的振舞）のタイミングに関する状態変数（圧力センサの圧力変化や加速度センサの加速度変化など）が入力される（ステップS301）。これに基づいて制御対象側の位相（歩行リズムの位相）が計算され（ステップS302）、演算部32においてNLSモジュール13内部の位相（歩行機械11の歩行リズムの位相）との位相差が例えば（式3）により計算される（ステップS303）。さらに、（式1）によって、NLSモジュール13内部の位相の相互作用に起因する時間的変化量が計算され（ステップS304）、それに基づいて新しい位相が定められる（ステップS305）。そして例えば、歩行機械11側の脚接地に対応する位相が新しい位相にマッチングすると、信号出力部33から歩行機械11の脚接地タイミングに関する状態変数（リズム音など）が発生し制御対象側に伝えられる（ステップS306）。

#### 【0057】

次に、図5と図7を参照する。制御器側に対応する歩行機械11のFBSモジュール14における信号入力部41には、制御対象側である歩行機械12における脚接地（動的振舞）のタイミングに関する状態変数（圧力センサの圧力変化や加速度センサの加速度変化など）が入力される（ステップS401）。これに基づいて制御対象側の位相（歩行リズムの位相）が計算され、演算部42においてNLSモジュール13内部の位相との関係量としての位相差が例えば（式3）により計算される（ステップS402）。ここまではNLSモジュール13での処理フローと同じであり（NLSモジュール13内部の位相の入力が加わるが）、これらの処理プロセスは両モジュール間で共有されてもよい。さらにFBSモジュール14では、測定された位相差（関係量）と目標とする位相差（目標とする関係量）との差が計算され（ステップS403）、例えば（式4）によりフィードバック制御信号FBが計算され（ステップS404）、それに基づいてNLSモジュール13のダイナミクスを規定する例えば（式1）の固有振動数 $\omega_1$ （パラメータ）の修正量が例えば（式5）に基づいて計算される（ステップS405）。この修正量が例えば信号出力部43を介してNLSモジュール13に対して伝えられ、パラメータが調整される（ステップS406）。このように、機械-機械系においても、非線形システムの特性を活かし、しかも、それをフィードバック制御できるようにして、関係的システム制御方法を実現できる。

#### 【0058】

群ロボットの要素ロボットあるいはマルチエージェント系の部分系に非線形振動を生じさせるモジュールを装備し、関係的システム制御手法を適用することによって、要素ロボットあるいは個々のエージェント間で様々なプロセスのタイミング同期とその位相差の制御ができる。特に、このような多体システムにおけるタイミング同期の問題は集中制御系以外ではこれまで手がつけられていなかったが、関係的システム制御手法における分散制御系でそれがはじめて可能になる。そして、要素ロボットあるいは個々のエージェントがあらかじめ有する非線形性によって振動を生じさせる場合には、そのダイナミクスを積極的に制御に利用することも可能である。

#### 【0059】

また、例えば、一つの移動ロボットの後をほぼ一定間隔保って追いかけるようにプログラムされた移動ロボットが複数個あり、メリーゴーラウンドのように円周上に配置されたとする。このうちの一つの移動ロボットの走行を所定時間継続してやれば、他の移動ロボットは前の移動ロボットの後ろから同じピッチ、同じスピードで追いかけ、その結果複数の移動ロボット群は円周上を回り続ける。すなわち、前の移動ロボットは後の移動ロボットに対し非線形制御をする関係にあるといえる。ここで、外部からの遠隔操作などで一つの移動ロボットのピッチを早くしてやれば、他の移動ロボットは前の移動ロボットの後ろ

から同じピッチで追いかけることになり、移動ロボット群のスピードをコントロールできる。

#### 【0060】

また、流れ作業ラインでは、各装置はそれぞれの固有のピッチで同じ処理を繰り返しながら、次の装置に処理を引き継いでいる。状況に応じて処理が早く済んだり、遅くなることもあり、各装置間の受け渡しのピッチには非線型性が入りうる。もし、人間の操作が入るようであればなおさらである。従来は集中制御系でタイミング制御が行なわれてきたが、関係的システム制御手法における分散制御系を適用をすれば、処理のピッチを状況に応じて可変に設定することが可能になる。

#### 【0061】

以上のことから、本実施例によれば、非線形システムの特性を活かし、しかも、それをフィードバック制御できるようにしたことで、これまでは扱うことができなかった多体システムのタイミング同期およびその制御を実現できる。

#### 【0062】

つぎに、本発明にかかる第3の実施例として、機械－人間の集合系における協調作業の例について具体的に説明する。

#### 【0063】

第1の実施例における機械－人間系のタイミング制御および第2の実施例における機械－機械系のタイミング制御を連結適用すれば、人間とロボットのような機械が集団で協調作業するシステムにも適用可能であるし、遠隔地でネットワークを介して集団で協調作業するシステムにも応用可能である。なお、制御器側と制御対象側の同調を無線又はネットワークを介して行うことにより、離れた人間やロボット間の協調を比較的容易に実現できる。

#### 【0064】

人間とロボットの協調作業については、複数の人間と複数のロボットが協調して歩行リハビリテーションを行ったり、同様に複数の人間と複数のロボットが協調して音楽アンサンブルを楽しむなど、人間の社会的コミュニケーションに係わる様々な実施形態が考えられる。また、ネットワークを介する協調作業については、ネットワーク上のエージェント（ソフトウェアモジュール）を介して、遠隔地リハビリテーションや遠隔地アンサンブルに限らず、遠隔地間で人間の社会的コミュニケーションの様々な局面で協調作業を実現することが可能である。

#### 【0065】

また、交通の流れに合わせて信号をコントロールする交通システムにおいて、例えば、1つの信号機は隣接する複数の信号機から信号表示タイミングのデータをもらい、かつ現場の交通状況をモニタリングしながら、自身の信号機のタイミングを決定する交通システムでは、交通状況がその都度異なること、隣接する複数の信号機からのタイミングの不整合が生じ得ること、自動車の運転は主として人間が行なうことから、信号による交通の制御には非線形性が入る。信号機間の同調は時間をずらして行う必要があるが、信号機同士が信号表示のタイミングをコントロールし合い、関係的システム制御方法における分散制御系を適用をすれば、スムーズな交通の流れに近づけられる可能性がある。

#### 【0066】

以上のことから、本実施例によれば、非線形システムの特性を活かし、しかも、それをフィードバック制御できるようにしたことで、これまでに扱うことができなかった機械－人間の集合系の社会的コミュニケーションに係わる様々なタイミング同期とその制御が実現できる。

#### 【0067】

また、本発明は実施の形態に記載された制御方法を制御器に実行させるためのプログラムとしても実現できる。プログラムは制御器内蔵のROMやRAMに記録され、使用されても良く、記録装置やCDROMから読み出されて使用されても良く、インターネットから制御器にダウンロードされ、使用されても良い。

## 【0068】

なお、本発明は上述の発明の実施の形態に限られず、本発明の要旨を逸脱することなくその他種々の構成を採り得ることはもちろんである。

## 【0069】

例えば、実施の形態では、関係量を位相差とする例を説明したが、関係量を振動数差としても良い。また、NLSモジュールの演算部で制御対象との相互作用と演算処理の両方を行う例を説明したが、相互作用を別の部位で行っても良い。また、上記実施の形態以外にも、コンピュータネットワークを利用したシステムには双方向通信教育など非線形性を有する例が多数ありうる。また、制御器と制御対象間での状態変数の受け渡しに使用するセンサや伝達手段も様々である。

## 【0070】

また、人間-人間系における協調作業やコミュニケーションの支援を取り上げることもできる。すなわち、人間の動作およびその相互作用そのものが非線形システムであるから、インストラクターとしての人間が生徒としての人間にレッスンや教育をほどこす場合は、インストラクターと生徒間で非線形の相互作用が行われる。この場合、インストラクター及び生徒の両者に対して非線形の相互作用を行いつつ、両者の協調を支援する制御器、例えば夫々に同一又は異なるリズムを提供するペースメーカにも本発明を適用可能である。同様に、演者と観衆の関係についても、コンサートや講演会等におけるコミュニケーションを支援する制御器としての活用も期待される。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0071】

【図1】 本発明の実施の形態による非線形制御システムの構成例を模式的に示す図である。

【図2】 非線形振動の相互作用系の構成例を模式的に示す図である。

【図3】 NLSモジュールの構成例を模式的に示す図である。

【図4】 NLSモジュールの処理アルゴリズムをフローチャートとして示す図である。

。

【図5】 FBSモジュールの構成例を模式的に示す図である。

【図6】 FBSモジュールの処理アルゴリズムをフローチャートとして示す図である。

。

【図7】 実施例1における機械-人間系制御システムの構成例を模式的に示す図である。

## 【符号の説明】

## 【0072】

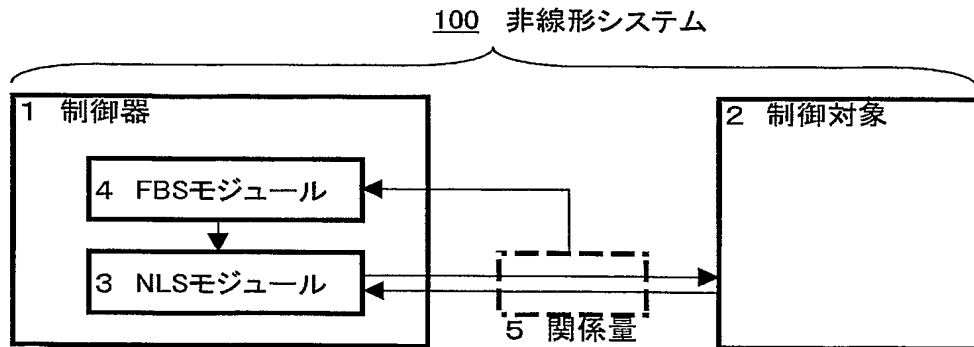
- 1 制御器
- 2 制御対象
- 3 NLSモジュール
- 4 FBSモジュール
- 5 関係量
- 6、7 部分系
- 11 歩行機械
- 12 歩行運動
- 13 NLSモジュール
- 14 FBSモジュール
- 15 信号入力機構
- 16 信号出力機構
- 31 信号入力部
- 32 演算部
- 33 信号出力部
- 41 信号入力部



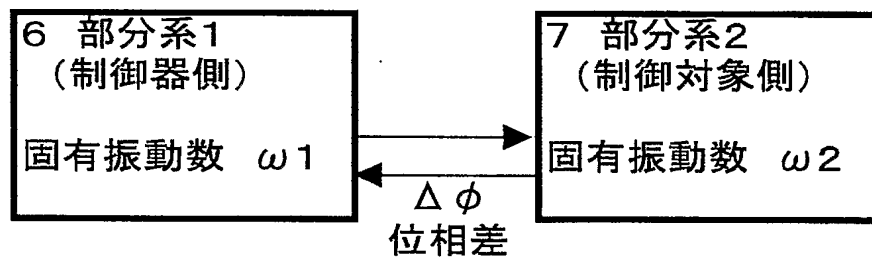
4 2 演算部  
4 3 信号出力部  
1 0 0、2 0 0 非線形システム  
 $\Delta \phi$  位相差  
 $\omega 1$ 、 $\omega 2$  固有振動数

【書類名】 図面

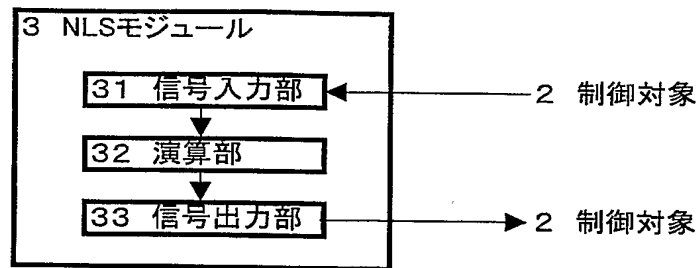
【図 1】



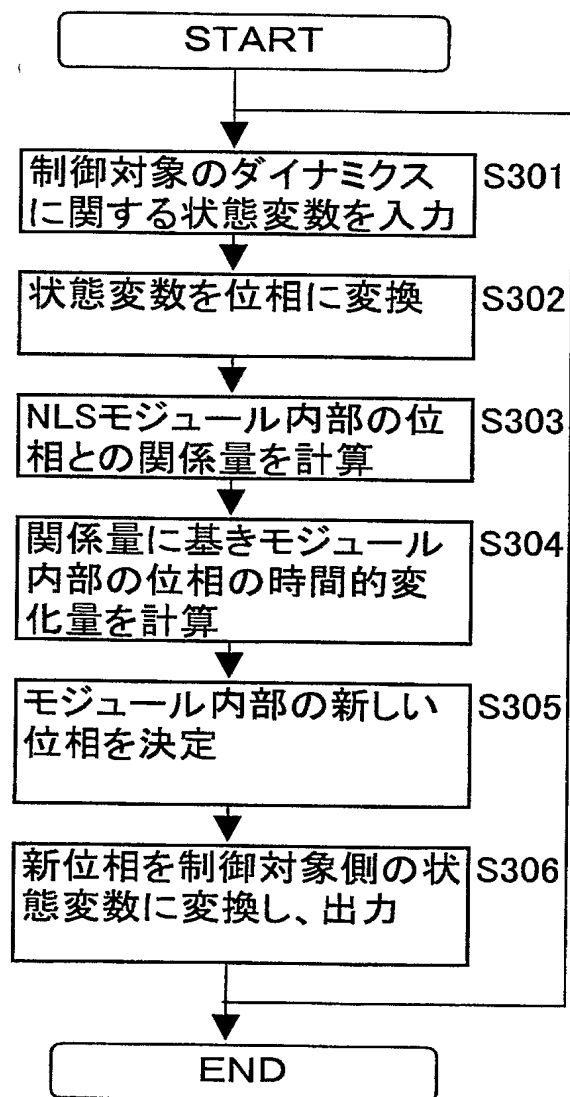
【図 2】



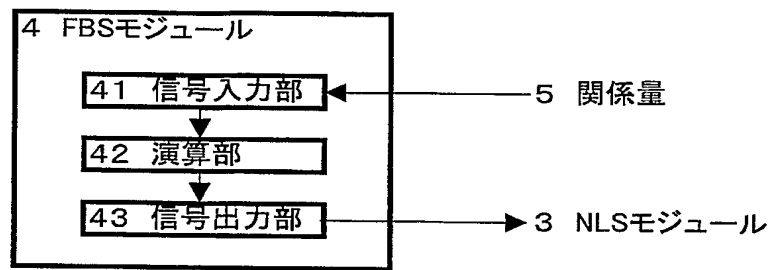
【図 3】



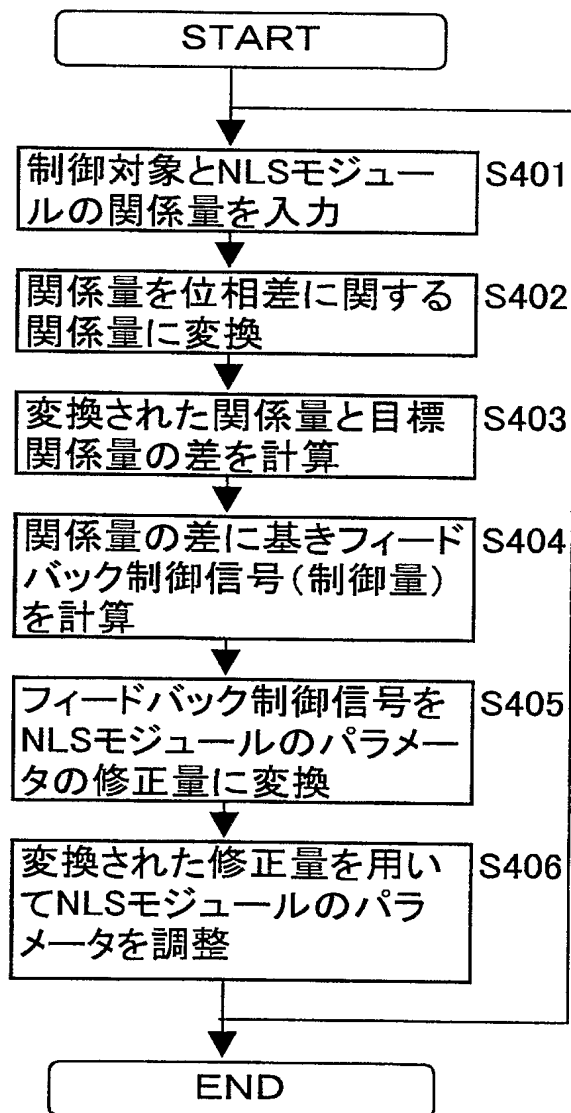
【図 4】



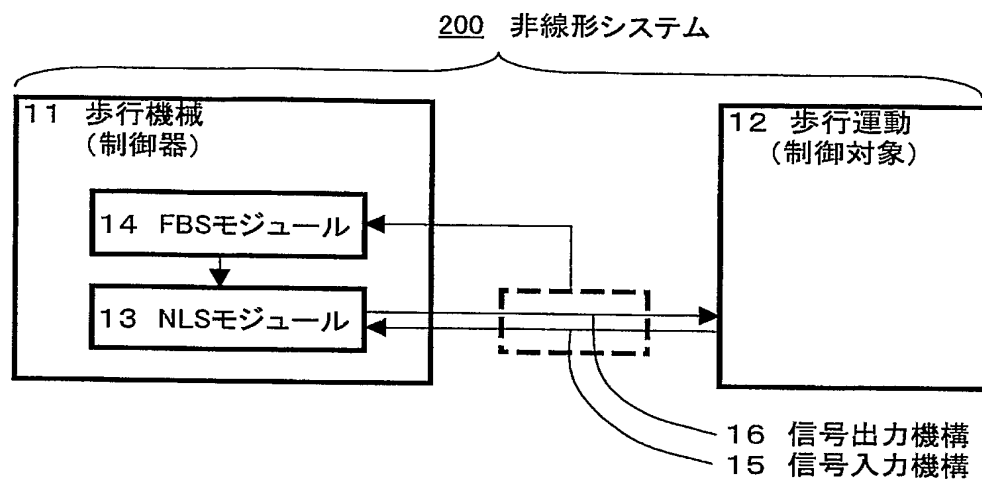
【図 5】



【図 6】



【図 7】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 本発明は、制御器 1 と制御対象 2 を明確に分離できない非線形システムの場合においても、制御器 1 と制御対象 2 の関係を目標とする関係へ収束させることを可能にする新しい制御器および制御方法を提案することを目的とする。

【解決手段】 本発明による制御器 1 は非線形システムとしての動的振舞を有する第 1 のモジュール 3 とフィードバックシステムとしての第 2 のモジュール 4 から構成される。第 1 のモジュール 3 は制御対象 2 との間で、相互作用における引き込み現象を介して同調状態を成立させる。第 2 のモジュール 4 は、第 1 のモジュール 3 と制御対象 2 との同調状態において、同調に係わる関係量 5 と目標とする関係量との差に基づいて、第 1 モジュール 3 のパラメータを調整するようフィードバックをかける。これによって、同調に係わる関係量 5 を目標とする関係量に収束させることにより、制御対象 2 を制御する。

【選択図】 図 1

特願 2 0 0 4 - 0 3 4 1 7 4

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [ 8 9 9 0 0 0 0 1 3 ]

1. 変更年月日	1 9 9 9 年 9 月 1 7 日
[変更理由]	新規登録
住 所	東京都目黒区大岡山 2 - 1 2 - 1
氏 名	財団法人理工学振興会